

УДК 621.914

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.01

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПЯТИОСЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНЫХ ФОРМ ТИПА МОНОКОЛЕСО ИЗ МОНОЛИТНОЙ ЗАГОТОВКИ

И. В. БОНДАРЬ*, Д. В. КРИВОРУЧКО

Кафедра «Технология машиностроения, станки и инструменты», Сумский государственный университет, Сумы, УКРАИНА

*email: ishkabond@gmail.com

АННОТАЦИЯ В настоящее время детали машин становятся все более сложными и точными. В этих условиях применение многоосевых станков с ЧПУ является действенным решением поставленных задач, так как различные компоновки этих станков позволяют обрабатывать детали разной серийности, габаритов и конфигураций. В работе представлена классификация деталей, требующих пятиосевой обработки. Рассмотрены особенности и резервы повышения эффективности пятиосевой обработки выделенных типов деталей. Отдельно рассмотрены методы повышения эффективности пятиосевой обработки деталей сложных форм (типа турбинных лопаток, крыльчаток и др.) на всех этапах обработки (черновая обработка; получистовая обработка; чистовая обработка). Выделены моменты, которым следует уделять особое внимание при пятиосевой обработке деталей сложных форм типа моноколесо из монолитной заготовки.

Ключевые слова: пятиосевая обработка; детали сложных форм; моноколесо; вибрация; стратегия обработки.

REVIEW OF MODERN METHODS OF FIVE-AXIS MACHINING ON CNC MILLING MACHINES OF COMPLEX PARTS SUCH AS BLISK FROM MONOLITHIC BILLET

I. BONDAR¹*, D. KRIVORUCHKO²

Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools, Sumy State University, Sumy, UKRAINE

ABSTRACT At the present time, the parts of the machines are becoming more complex and precise. This requires the development of new machining technologies. In these conditions, multi-axis CNC machining is one of those technologies. Various configurations of five-axis machines allow processing parts of different series, dimensions and configurations. In spite of the 20-year history of development, this approach still requires increasing efficiency in implementation to modern tasks. This article presents classification of the parts requiring five-axis machining. Three types of parts are identified: prismatic parts; molds, stamps; parts of complex forms. Each of the types of parts requires different approaches to processing, different methods for improving efficiency. The features of processing of parts of complex forms such as blisk are considered separately. In this article methods of increasing the efficiency of five-axis machining of complex parts (such as turbine blades, impellers, etc.) at all stages of processing (roughing, semi-finished processing, finishing) are considered. It was noted that special attention during the machining of blisk should be given:

- to the control of collisions between machine components and parts;
- to control and reduce of vibration during the machining of thin-walled parts;
- to simulation of machining on the machine;
- to productivity issues.

All listed items are detailed in this article.

Keywords: Five-axis machining; parts of complex forms; blisk; machining strategy; the trajectory of machining; vibration.

Введение

В современных условиях высокой конкуренции вопросы повышения качества производимой продукции и сокращения сроков изготовления актуальны во всех отраслях машиностроения. Следовательно, растет потребность изготовления детали на одном станке (см. рис 1) с минимальным количеством установов, что значительно сокращает время изготовления детали и способствует повышению ее качества. Пятиосевая обработка обеспечивает возможность изготовления пространственно сложных деталей современных машин с высокой точностью и качеством.

На рынке пятиосевых обрабатывающих центров представлено огромное количество моделей различных компоновок, что позволяет обрабатывать детали различной серийности, габаритов и конфигурации [1]. Следует учитывать, что детали различных конфигураций и назначения требуют различных подходов к обработке.

Вместе с тем представленные на рынке технические решения, реализующие пятиосевую обработку на фрезерных станках с ЧПУ, все еще требует совершенствования и повышения эффективности для реализации современных задач.

Цель работы

Целью данной работы является разделение деталей, требующих пятиосевой обработки, на классы с выявлением основных моментов, на которые следует обратить внимание, выявление основных тенденций в развитии пятиосевой обработки деталей сложных форм (типа моноколесо) и резервов повышения ее эффективности.

Классификация деталей, требующих пятиосевой обработки

Пятиосевая обработка является современным трендом в металлообрабатывающей промышленности, обеспечивая широкие технологические возможности изготовления

пространственно сложных изделий. Компоновки пятиосевых станков дают возможность обрабатывать детали различной серийности, габаритов, конфигураций. Но следует учитывать особенности обработки деталей различной конфигурации и применимости.

В зависимости от конфигурации детали, требующие пятиосевой обработки можно разделить на три типа (рис. 2):

- призматические детали;
- пресс-формы, штампы;
- детали сложных форм (типа турбинных лопаток, крыльчаток и др).

Разделены детали таким образом потому, что у каждого из типов деталей есть свои нюансы при обработке, способы повышения эффективности производимой продукции.

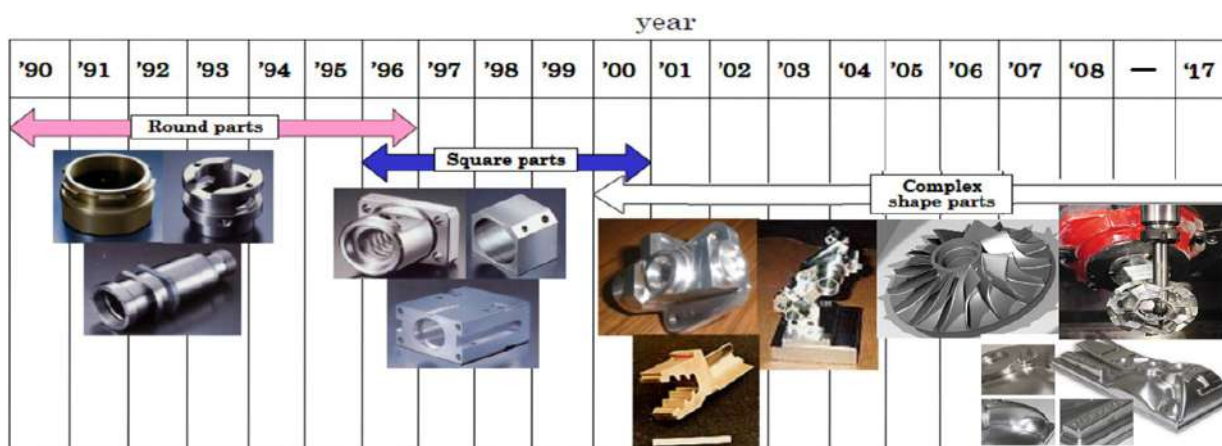


Рис. 1 - Изменение сложности деталей, изготавливаемых на одном станке

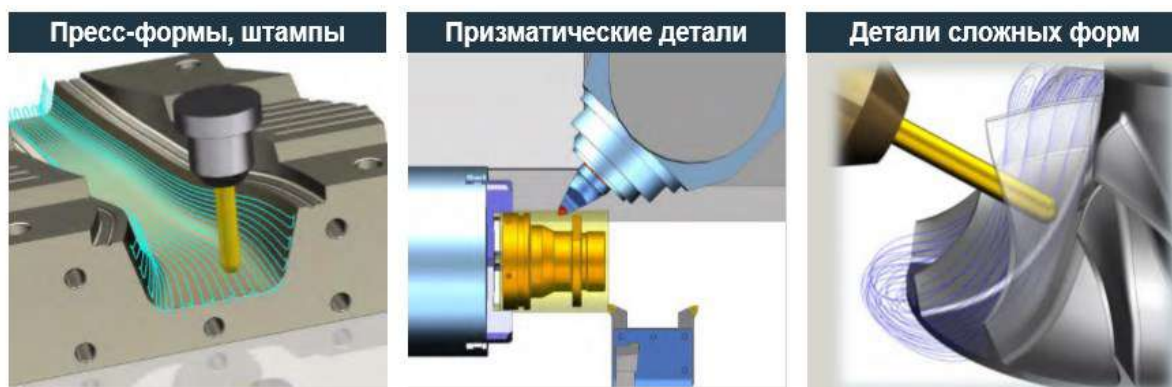


Рис. 2 - Классификация деталей, требующих пятиосевой обработки

Например, при обработке **призматических деталей** траектории движения инструмента обычно не характеризуются большой сложностью, но в данном типе деталей актуальна минимизация времени обработки. В настоящее время для сокращения времени обработки существует множество способов. Выбор оптимальной траектории обработки – одно из перспективных направлений, активно

развивающихся. На рис. 3 для примера представлено сравнение стандартной и усовершенствованной трохоидальной стратегий обработки. Последняя характеризуется сглаженными траекториями, что в отличие от острых углов в стандартной стратегии не влечет за собой движение инструмента с ускорением и как следствие ускоренного износа инструмента. При обработке неравномерных поверхностей (канавок,

выступов) детали с использованием усовершенствованной трохональной стратегии обработки обеспечивается постоянный угол перекрытия, что обеспечивает [2, 3]:

- длительный срок службы инструмента;
- высокую производительность.

Последняя разработка в данном направлении – стратегия Vortex (стратегия для высокоскоростной и пятиосевой обработки). Данная стратегия представляет собой генерацию САМ-системой особых «вихревых» траекторий, обеспечивающих постоянный угол перекрытия. Как следствие, обеспечиваются стабильные режимы резания.

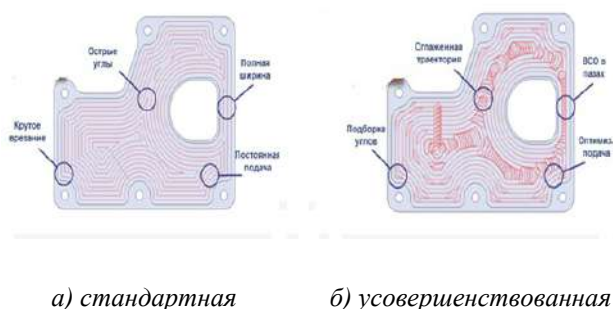


Рис. 3 – Тенденции усовершенствования современной стратегии обработки

Другой подход к уменьшению времени обработки – сокращение и оптимизация пути траектории инструмента при обработке. Так в [4] описан метод определения ширины обработки (рассчитанной как пересечение эллиптического профиля, являющийся проекцией нижней части инструмента в плоскость перпендикулярную направлению подачи) с дальнейшим генерированием траектории инструмента с постоянной высотой гребешка для концевых фрез. В дальнейшем метод определения ширины обработки был уточнен и усовершенствован [5-7]. Однако все эти методы вычисляют ширину полосы обработки в определенном месте на основе одной позы инструмента, что приводит к существенным ошибкам в предсказании гребешка, так как движение инструмента до и после определенного положения влияет на форму удаляемого материала. В [8] описан алгоритм, основанный на более точном и реалистичном расчете ширины полосы обработки и генерации траектории пятиосевого инструмента. Как только позиции инструмента известны, можно рассчитать ширину полосы обработки (синяя и красная кривая на рисунке 4). Проанализировав ширину полосы механической обработки (рис.4 (справа)), можно заметить, что в некоторых регионах траектория инструмента слишком сильно перетекает в необработанную зону, оставляя остаток материала на границе, в то время как в других зонах эффективность обработки очень низкая (синяя кривая почти на

границе линии без обработки). Это означает, что части траектории инструмента должны быть отрегулированы для лучшего использования ширины полосы обработки (зона с низкой эффективностью на рисунке 4), либо ближе к границе, чтобы полностью обработать необработанную область на границе.

Для деталей типа **пресс-форм** характерно:

- изготавливаются из твердых материалов;
- к ним выдвигаются высокие требования к качеству поверхности.

При обработке формообразующей оснастки (например, штампов, пресс-форм, литейных форм и т. д.) большое внимание уделяют качеству поверхности, производительности обработки, возможности использовать закаленные материалы. Здесь очень эффективны высокоскоростная обработка, симуляция обработки и возможность автоматического отслеживания изменений в конструкции изделия или оснастки.

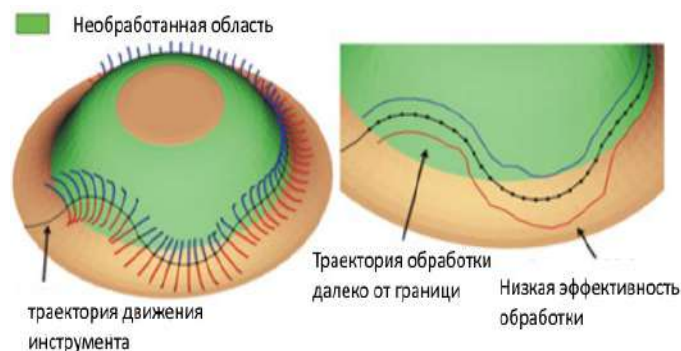


Рис. 4 - Анализ траектории обработки

Особенности обработки деталей сложных форм типа моноколеса

Детали сложных форм типа турбинных лопаток, моноколеса и т. д. являются одними из основных элементов лопаточных машин, которые в зависимости от взаимодействия с потоком рабочей среды бывают разных типов (рис. 5) [9]. В зависимости от типа лопаточной машины и конкретной конструкции рабочие колеса также будут различными по конфигурации и конструктивно-технологическому признаку. Различают два класса рабочих колес в зависимости от конструктивно-технологического признака (рис. 6) [10, 11]:

- рабочие колеса, с лопатками и диском изготавливаемыми отдельно (рис. 6, а);
- моноколеса, с лопатками и диском изготавливаемыми как единое целое (рис. 6, б).

Не зависимо от класса и конкретной конфигурации рабочих колес существует ряд характеристик, важных при обработке на пятикоординатном обрабатывающем центре, схожих для всех рабочих колес:

- характеризуются сложной геометрией;

- характеризуются сложными 5-осевыми траекториями;
- характеризуются понижением жесткости в области тонкостенных элементов детали;
- часто изготавливаются из труднообрабатываемых материалов.

При обработке рабочих колес особое внимание следует уделять:

- контролю над столкновениями узлов станка и элементов детали;
- контролю и понижению вибрации при обработке тонкостенных элементов детали;
- симуляции обработки на станке;
- вопросам повышения производительности.



Рис. 5 - Типы лопаточных машин

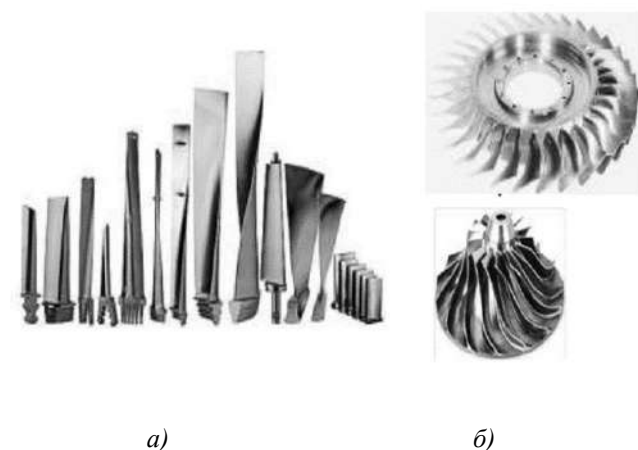


Рис. 6 - Классы рабочих колес в зависимости от конструктивно-технологического признака

Пятиосевая обработка является наиболее актуальным методом изготовления моноколес из монолитной заготовки [12]. Техпроцесс фрезерования можно подразделить на три этапа [13]: черновая обработка; получистовая обработка; чистовая обработка.

На этапе черновой обработки заготовки при изготовлении моноколеса удаляется практически весь объем металла из межлопаточного пространства.

Также на этом этапе, если это необходимо, выравниваются припуски на поверхностях спинки и корыта пера лопатки и поверхности втулки.

Конечный результат черновой обработки - заготовка с равномерным слоем припуска [14]. При обработке на трехкоординатном станке черновая обработка межлопаточного пространства осуществляется последовательно с двух сторон, дальше необходимо повернуть делительный диск стола приспособления с заготовкой на шаг следующей лопатки, и повторить цикл обработки сначала необходимое количество раз. Пятиосевая же обработка позволяет выполнить данную операцию за один установ, чем существенно сокращает время обработки [15].

Задачей технолога-программиста на этапе получистовой обработки является обеспечение точности размеров, форм и расположения поверхностей, как указано в требованиях рабочего чертежа.

Чистовая обработка является окончательным этапом и должна обеспечивать требуемое качество поверхностного слоя (шероховатость и т.д.).

Методы черновой обработки рабочего колеса типа моноколесо из монолитной заготовки

Черновая обработка рабочего колеса типа моноколесо из литой заготовки предполагает прорезку межлопаточных каналов, при этом удаляется практически весь объем металла из межлопаточного пространства.

Предварительная прорезка производится фрезами различной конфигурации со своими достоинствами и недостатками.

Один из способов прорезки межлопаточных каналов - прорезка дисковой фрезой. Данный тип обработки высокопроизводительный. Недостаток данного метода: невозможно обрабатывать моноколесо с большой закруткой пера лопатки.

Второй способ - фрезерная обработка концевой фрезой, данный метод является более востребованным. Обработку концевой фрезой можно выполнить различными стратегиями: плоская обработка по строкам; вертикальное (плунжерное фрезерование).

При строчном фрезеровании межлопаточный канал образуется в следствии многопроходного огибания лопатки конической фрезой с постоянным перемещением по ее высоте. Метод строчного фрезерования обеспечивает более ровный сьем материала, чем при плунжерном фрезеровании и позволяет избежать уступов на обрабатываемой поверхности [16].

Плунжерное фрезерование предполагает обработку торцевой поверхностью и движение подачи вдоль оси фрезы (рис. 8). Применение плунжерного фрезерования (в сравнении со строчным) позволяет повысить жесткость и уменьшить вибрацию во время

процесса резания, так как повышается стойкость инструмента за счет того, что основное усилие резания направлено вдоль оси инструмента [16]. Как следствие – повышается производительность, так как повышенная стойкость инструмента позволяет повысить подачу до максимально возможной для конкретного станка [17, 18]. Недостатком данного метода является более высокое значение межстрочных гребешков, чем при строчном фрезеровании [18].

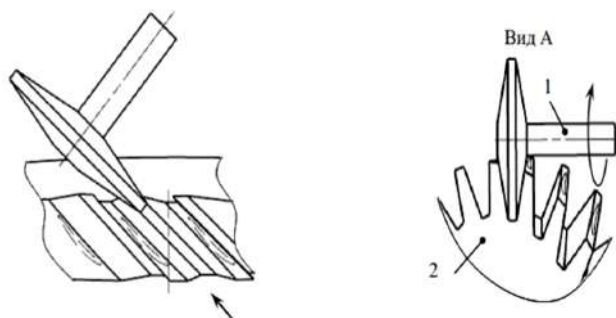


Рис. 7 - Прорезка межлопаточных каналов осевых моноколес дисковой фрезой:

1 – дисковая модульная фреза;
2 – монолитная заготовка.

Один из способов повышения производительности прорезания межлопаточных каналов из цельной заготовки является применение кольцевого инструмента (инструмента в виде тела вращения, имеющего внутреннюю полость, с режущими кромками, расположенными на наружной, внутренней и торцевой части инструмента) [9]. На данный момент исследованы несколько типов кольцевых инструментов, которые могут применяться для прорезания межлопаточных каналов моноколес:

- кольцевая фреза;
- кольцевая пила;
- чашечный алмазный круг.

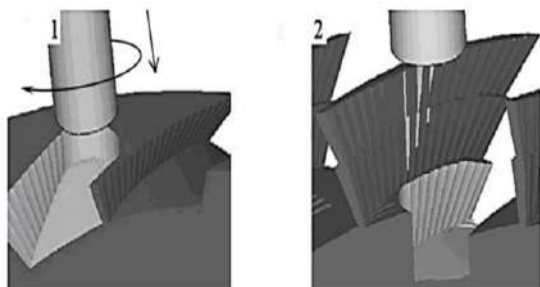


Рис. 8 - Плунжерное фрезерование межлопаточного канала [18]:

1 – межлопаточный канал в начале обработки;
2 – межлопаточный канал в конце обработки

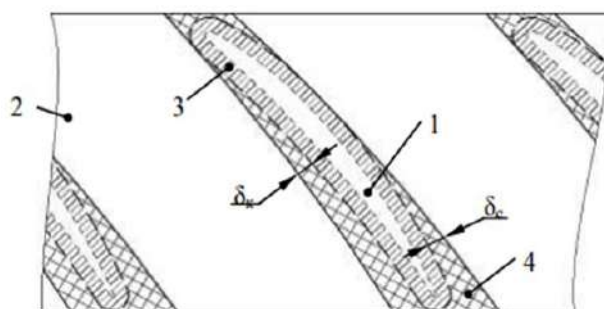


Рис. 9 - Погрешность формообразования межлопаточных каналов кольцевым инструментом:

1 – теоретический профиль пера лопатки;
2 – удаленный объем материала межлопаточного канала;
3 – слой припуска;
4 – слой металла, образованный из-за погрешности формообразования.

В процессе обработки отмечается значительная погрешность формообразования δ , причиной возникновения которой является несоответствие профиля лопаток и формообразующего кольцевого инструмента (рис. 9) [19]. Уменьшается погрешность путем подбора оптимальных параметров режущего инструмента (максимальная и минимальная ширина режущей части, диаметр инструмента и глубина внутренней полости) в зависимости от геометрических параметров моноколеса. Также следует отметить, что максимально приближенную к теоретической форме межлопаточного канала можно получить при увеличении количества осей управления, следовательно, пятиосевая обработка позволяет уменьшить погрешность формообразования по сравнению с трехосевой и является предпочтительной. Один из главных недостатков данной технологии обработки - отсутствие автоматизированных методик управления движением кольцевого инструмента, а ручной расчет очень трудоемкий. Автоматизированные методики современных САМ-систем способны рассчитать траекторию движения инструмента с внешней и торцевой режущей частью. Следовательно, необходимо произвести дополнительные построения, чтобы система учитывала внутреннюю режущую часть.

Методы понижения вибрации при обработке тонкостенных элементов моноколеса

При фрезеровании тонкостенных элементов деталей, таких как компрессорные лопатки на пятиосевых обрабатывающих центрах одной из основных проблем является вибрация, которая возникает вследствие низкой жесткости лопатки, низкой жесткости пятиосевого станка по сравнению с трехосевым таких же габаритов и снижение

жесткости СПИД системы в целом из-за ее сложной пространственной конфигурации [1, 20]. Возникающая вибрация отрицательно влияет на качество обработанной поверхности, точности изготовления, может привести к образованию на обработанной поверхности дефектов и порче детали, снижению эффективности обработки [21].

Один из методов понижения вибрации на этапе получистовой и чистовой обработок является применение демпфирующих сред. Демпфирующая среда, которая заполняет межлопаточное пространство обрабатываемых моноколес, способствует [9, 22, 23]:

- повышению жесткости тонкостенного элемента детали;
- уменьшает значение отклонения тонкостенного элемента детали от положения равновесия в момент резания фрезой;
- эффективному подавлению колебаний тонкостенного элемента детали во время холостого хода, между двумя резами соседних зубьев фрезы;
- повышению качества обработанной поверхности.

Для оценки зон устойчивости к автоколебаниям применяют так называемые «лепестковые диаграммы» (рис. 10) [24], определяемые расчетом для данного инструмента и технологической системы. Информация о нестабильных (зоны над кривой) и стабильных (зоны под кривой) областях позволяет определить глубину резания в соответствии со скоростью вращения шпинделя, при которой технологическая система будет виброустойчивой [25, 26]. Однако, диаграммы стабильности не постоянны в процессе обработки, т.к. по мере удаления припуска изменяются и динамические условия резания [27].

На понижение вибрации при пятиосевой обработке можно повлиять при помощи выбора инструмента подходящей геометрии [24]. Так, более жесткой и прочной будет фреза с большим диаметром, следовательно, нужно выбирать максимально возможный диаметр фрезы исходя из геометрии обрабатываемой детали. Если диаметры одинаковы – более виброустойчив будет инструмент с большим количеством зубьев, но с увеличением количества зубьев ухудшается отвод стружки, это тоже следует учитывать. В диапазоне возникновения регенеративных автоколебаний эффективным будет применение фрез с зубьями, заточенными по задней поверхности, фрез с переменным шагом зубьев [29], фрез с разницей в углах наклона соседних зубьев [30]. Регенеративные автоколебания возникают только в определенном диапазоне частот вращения шпинделя. Если определяющее соотношение (ОС) – отношение времени резания одним зубом (трез) к периоду собственных колебаний элемента заготовки или технологической системы (Тскз), находится в диапазоне от 1 до 7, то возникают регенеративные автоколебания. Если ОС не находится в этом диапазоне, возникают вынужденные колебания и

применение несимметричных фрез будет неэффективно и может привести к возбуждению дополнительной неуравновешенности процесса обработки [31].

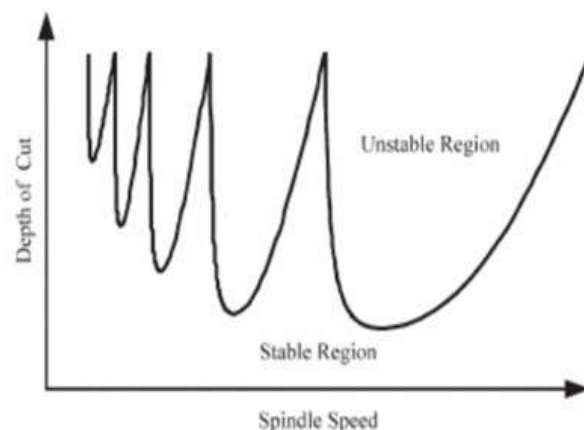


Рис. 10 - Типичная лепестковая диаграмма стабильности

Стратегия обработки

При пятиосевой обработке моноколес ввиду их сложной тонкостенной поверхности, узкого межлопаточного пространства, все еще есть много проблем с точностью, качеством и эффективностью обработки. Обработка условно подразделяется на обработку лопатки, межлопаточного пространства (ступицы), рассекателя и связующих их элементов (бандажа и скругления лопатки) (см. рис.11). Основными стратегиями обработки, реализуемыми в современных САМ-системах, для обработки являются «проекция поверхности» (для обработки межлопаточного пространства) и «боком фрезы» (для обработки лопаток колеса компрессора) [32]. Недостаток стратегий – большой вылет инструмента и зарезы и требуется корректировка программы вручную. Общий смысл редактирования данной стратегии заключается в том, чтобы переориентировать ось инструмента посередине межлопаточного пространства и тем самым уменьшить вылет фрезы и исключить возможность зарезов. Классический метод решения данной задачи требует от инженера-программиста глубоких знаний в пятиосевой обработке, умения строить справочные поверхности в САД системе. Время программирования может занимать от нескольких часов до нескольких дней (в зависимости от сложности изделия).

Более современный метод обработки – применение модуля «моноколесо», доступного в современных САМ-системах. С использованием данного модуля инженер-программист выбирает геометрию, определяющую моноколесо или крыльчатку в отдельные наборы данных; задает

величины глубины и ширины резания; способ наклона фрезы (атаки). Далее программа автоматически определяет угол наклона поверхностей лопаток, образующих межлопастное пространство, что позволяет создать траекторию без разрывов, что является важным при обработке моноколеса, так как в некоторых случаях вертикальное врезание в материал (возникает из-за разрыва траектории) не допустимо. В данном модуле обработка лопаток ведется вершиной фрезы, что специально предусмотрено для фрезерования прочных сплавов, однако для фрезерования боковых поверхностей лопаток моноколеса, изготовленных, например, из алюминиевых сплавов, более эффективной будет обработка боковых поверхностей боком фрезы. По сравнению с классическими стратегиями обработки применение модуля «моноколесо» сокращает время программирования более чем в два раза [32].

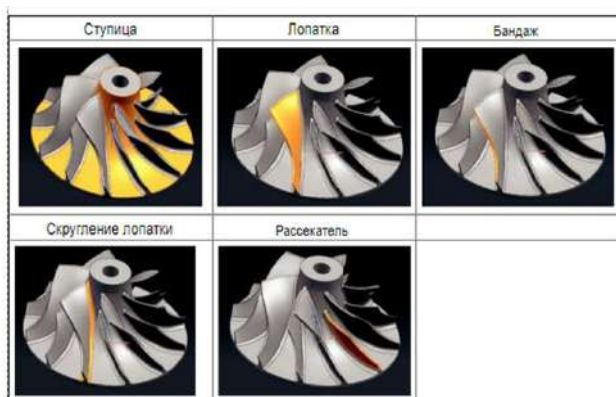


Рис. 11 - Схема обработки моноколеса

Выводы

Различие конфигураций и применяемости деталей требует различных подходов к их обработке. В зависимости от конфигурации выделено три типа деталей: призматические детали; пресс-формы, штампы; детали сложных форм (типа турбинных лопаток, моноколес и др).

Деталям призматической конфигурации не свойственны сложные траектории, но актуальна минимизация времени обработки. Детали типа пресс-форм часто изготавливаются из твердых материалов, при их изготовлении большое внимание уделяют качеству поверхности. Детали сложных форм (типа турбинных лопаток, моноколес и др) характеризуются сложной геометрией; сложными 5-осевыми траекториями; понижением жесткости в области тонкостенных элементов детали; часто изготавливаются из труднообрабатываемых материалов. При обработке каждого типа деталей необходимо учитывать все их особенности и предъявляемые к ним требования.

При фрезеровании тонкостенных элементов деталей, таких как компрессорные лопатки на

пятиосевых обрабатывающих центрах одной из основных проблем является вибрация, которая возникает вследствие низкой жесткости лопатки, низкой жесткости пятиосевого станка по сравнению с трехосевым таких же габаритов и снижение жесткости СПИД системы в целом из-за ее сложной пространственной конфигурации

В силу того, что виброустойчивость процесса фрезерования зависит не только от режимов резания, но и от жесткости технологической системы в текущем ее состоянии перспективным направлением является разработка САМ систем, способных еще на стадии проектирования обработки спрогнозировать и учесть деформацию и вибрационное состояние технологической системы, внося, например, поправки в траекторию инструмента и режим резания.

Список литературы

1. **Бондарь, И. В.** Пятиосевая обработка на фрезерных станках с ЧПУ / **И. В. Бондарь, Д. В. Криворучко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № № 7 (1229). – С. 10-17. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.02.
2. **Евченко, К.** Стратегия Vortex и технология оптимизации MachineDNA от компании Delcam – новые возможности для повышения производительности фрезерной обработки / **К. Евченко, Д. Маслов, А. Пинчук, С. Таликин** // *Оборудование и инструмент для профессионалов.* – 2013. – №1. – С. 112-115.
3. **Евченко, К.** PowerMILL 2013: стратегия Vortex и новые возможности для программирования пятиосевой обработки / **К. Евченко, А. Пинчук** // *САПР и графика.* – 2012. – №11. – с. 88-91.
4. **Lee, Y-S.** Adaptive Tool Path Planning for 5-axis Sculptured Surface Machining by Machining Strip Evaluation / **Y-S. Lee** // *SSM '98: Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 International Conference on Sculptured Surface Machining.* – 1999. – 351–360. – doi 10.1007/978-0-387-35392-0_36.
5. **Chiou, C-J.** A Machining Potential Field Approach to Tool Path Generation for Multi-axis Sculptured Surface Machining / **C-J. Chiou, Y-S. Lee** // *Computer-Aided Design.* – 2002. – 34. – 357–371. – doi 10.1016/S0010-4485(01)00102-6.
6. **Tournier, C.** Iso-scallop Tool Path Generation in 5-axis Milling / **C. Tournier, E. Duc** // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2005. – 25. – 867–875. – doi 10.1007/s00170-003-2054-7.
7. **Barakchi Fard, M.** Effect of Tool Tilt Angle on Machining Strip Width in Five-axis Flat-end Milling of Free-form Surfaces / **M. Barakchi Fard, H-Y. Feng** // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2009. – 44. – 211–222. – doi 10.1007/s00170-008-1828-3
8. **Lauwers, B.** Five-axis milling tool path generation with dynamic step-over calculation based on integrated material removal simulation / **B. Lauwers, D. Plakhotnik** // *Manufacturing Technology.* – 2012. – №61. – P. 139-142. – doi 10.1016/j.cirp.2012.03.090

9. **Курылев, Д.** Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом / **Д. Курылев**: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Казань, 2016. 134 с.
10. **Тихонов, Н. Т.** Теория лопаточных машин авиационных газотурбинных двигателей. Курс лекций. / **Н. Т. Тихонов, Н. Ф. Мусаткин, В. Н. Матвеев**. Изд-во СГАУ, Самара. 2001. – 155 с.
11. **Богуслаев, В. А.** Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Монография / **В. А. Богуслаев**. Запорожье: ОАО «Мотор Сич». – 2003. – 396 с.
12. **Крымов, В. В.** Производство лопаток газотурбинных двигателей / **В. В. Крымов, К. И. Зудин, Ю. С. Елисеев**. М.: Машиностроение, 2003. – С. 376.
13. **Гейкин, В. А.** Технология производства двигателей нового поколения / **В. А. Гейкин, Н. И. Шаронова** // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2010. – Т. 3, № 2 (45). – С. 11–13.
14. **Багров, С. В.** Оптимизация технологических процессов изготовления осевых моноколес компрессоров газотурбинных двигателей / **С. В. Багров, Л. Б. Уваров** // *Полет. Изд-во: Машиностроение*. – 2009. №12. – С. 24-32.
15. **Лунев, А. Н.** Обзор прогрессивных методов изготовления осевых моноколес авиационных газотурбинных двигателей / **А. Н. Лунев, Д. В. Курылев** // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 6-1. – с. 78-82.
16. **Кондратюк, Э. В.** Повышение эффективности процесса ВСФ центробежных колёс за счёт оптимизации режимов резания и использования высокопроизводительных методов обработки / **Э. В. Кондратюк, Г. В. Пухальская, В. Г. Жарик и др.** // *Вестник двигателестроения*. – 2012. – № 1. – С. 103-113.
17. **Панасенко, В. А.** Черновая обработка центробежных моноколёс ГТД с применением плунжерного фрезерования на обрабатывающих центрах с ЧПУ / **В. А. Панасенко, А. Я. Качан, В. Ф. Мозговой** // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 7. – С. 48-52.
18. **Witty, M.** Cutting tool geometry for plunge milling - process optimization for a stainless steel / **M. Witty, T. Berge, A. Schafer, G. Cabral** // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, Is. 8. – P. 1378-1386. – doi 10.1016/j.procir.2012.04.090.
19. **Лунев, А. Н.** Расчет кинематической погрешности при обработке кольцевым инструментом межлопаточного канала моноколес ГТД / **А. Н. Лунев, Л. Т. Моисеева, А. В. Стариков, Р. С. Ермаков** // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2007. – № 3. – С. 72-74.
20. **Болсуновский, С.** Применение специальных гасителей вибраций при чистовом фрезеровании тонкостенных деталей/ **С. Болсуновский, В. Вермель, Г. Губанов** // *САПР и графика*. – 2014. – №8. – с. 110 – 112.
21. **Junjin, M.** Vibration suppression of thin-walled workpiece machining considering external damping properties based on magnetorheological fluids flexible fixture / **M. Junjin, Z. Dinghua, W. Baohai L. Ming, Ch. Bing** // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2016. – Volume 29, Issue 4. – P. 1074-1083. – doi 10.1016/j.cja.2016.04.017.
22. **Внуков, Ю. Н.** Влияние демпфирующих сред на снижение вибраций упругой системы тонкостенной детали / **Ю. Н. Внуков [и др.]** // *Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр.* – Харків: НТУ "ХПИ". – 2013. – Вип. 8. – С. 85-100.
23. **Внуков, Ю. Н.** Опробование усовершенствованной технологии подготовки и нанесения демпфирующей среды на моноколеса ГТД при концевом фрезеровании / **Ю. Н. Внуков, А. И. Гермашев, В. Ф. Мозговой, К. Б. Балушок, Э. В. Кондратюк** // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 1. – С. 128-130.
24. **Внуков, Ю. Н.** Эволюция развития исследований сил при цилиндрическом фрезеровании от статических к динамическим условиям обработки (часть 2) / **Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова** // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2016. – вип. 11. – С. 20 - 41.
25. **Reza Kashyzadeh, K.** Study of Chatter Analysis in Turning Tool And Control Methods – A Review / **K. Reza Kashyzadeh, M. J. Ostad-Ahmad-Ghorabi** // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2012. – Vol. 2, Issue 4. – P. 1-5.
26. **Le Lan, J.-V.** Providing stability maps for milling operation / **J.-V. Le Lan, A. Marty, J.-F. Debongnie** // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2007. – № 47. – P. 1493-1496. – doi 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.026.
27. **Thevenot, V.** Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling / **V. Thevenot, L. Arnaud, G. Dessein, G. Cazenave-Larroche** // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 27. – pp.638-644. – doi 10.1007/s00170-004-2241-1.
28. **Внуков, Ю. Н.** О влиянии конструктивных и геометрических характеристик концевых фрез на виброустойчивость процесса фрезерования / **Ю. Н. Внуков, С. И. Дядя, Е. Б. Козлова** // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2016. – №86. – С. 7-17.
29. **Голдберг, М.** Увеличение производительности благодаря использованию инновационных инструментальных технологий / **М. Голдберг** // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2013. – №2. – С. 12-14.
30. **Winston A. Knight.** Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools / **Winston A. Knight**. Geoffrey Boothoyd. Third Edition, 2005. – 608 p.
31. **Козлова, О. Б.** Пригнічення регенеративних автоколивань при фрезеруванні тонкостінного елемента деталі кінцевими циліндричними фрезами / **О. Б. Козлова**: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.01. Харківський політехнічний ін-т, нац. техн. ун т., Харків, 2016. – 24 с.
32. **Тарабрин, Г.** САМ-система PowerMILL: изготовление моноколеса турбины за 2 часа! / **Г. Тарабрин, М. Савельев, А.Машков, С. Нестеров, Е. Коблова** // *САПР и графика*. – 2009. – №10. – с. 89 - 92.

Bibliography (transliterated)

1. **Bondar, I., Krivoruchko, D.** Five-axis machining on CNC milling machines. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **7** (1229), 10-17, doi: 10.20998/2413-4295.2017.07.02.
2. **Evchenko, K., Maslov, D., Pinchuk, A., Talikin S.** Vortex Strategy and Delphi MachineDNA Optimization Technology - New Opportunities for Improving Milling Performance. *Equipment and tools for professionals.* 2013, **1**, 112-115.
3. **Evchenko, K., Pinchuk, A.** PowerMILL 2013: Vortex strategy and new possibilities for programming five-axis machining. *CAD and graphics.* 2012, **11**, 88-91.
4. **Lee, Y-S.** Adaptive Tool Path Planning for 5-axis Sculptured Surface Machining by Machining Strip Evaluation. *SSM '98: Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 International Conference on Sculptured Surface Machining.* 1999, 351-360, doi: 10.1007/978-0-387-35392-0_36.
5. **Chiou, C-J., Lee, Y-S.** A Machining Potential Field Approach to Tool Path Generation for Multi-axis Sculptured Surface Machining. *Computer-Aided Design.* 2002, **34**, 357-371, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00102-6.
6. **Tournier, C., Duc, E.** Iso-scallop Tool Path Generation in 5-axis Milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2005, **25**, 867-875, doi 10.1007/s00170-003-2054-7.
7. **Barakchi Fard, M., Feng, H-Y.** Effect of Tool Tilt Angle on Machining Strip Width in Five-axis Flat-end Milling of Free-form Surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2009, **44**, 211-222, doi: 10.1007/s00170-008-1828-3.
8. **Lauwers, B., Plakhotnik, D.** Five-axis milling tool path generation with dynamic step-over calculation based on integrated material removal simulation. *Manufacturing Technology.* 2012, **61**, 139-142, doi: 10.1016/j.cirp.2012.03.090.
9. **Kurylev, D.** Fundamentals of multi-coordinate shaping of interlace channels of axial monocalcs under preliminary cutting with a ring tool: dis. ... cand. tech. Sciences: spec. 05.02.07. Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev (KNITU-KAI), Kazan, 2016, 134 p.
10. **Tikhonov, N. T., Musatkin, N. F., Matveev, V. N.** The theory of scapular machines of aviation gas turbine engines. *Lecture course. SGAU Publishing House, Samara.* 2001, 155 p.
11. **Boguslaev, V. A.** Technological support of operational characteristics of GTE parts. *Compressor and fan blades. Part I. Monograph Zaporozhye: Motor Sich JSC.* 2003, 396.
12. **Krymov, V. V., Zudin, K. I., Eliseev, Yu. S.** Production of gas turbine engine blades. - *M.: Mechanical Engineering,* 2003, 376.
13. **Geikin, V. A., Sharonova, N. I.** The technology of production of new generation engines. *East-European Journal of Advanced Technologies.* 2010, **3**, 2 (45), 11-13.
14. **Bagrov, S. V., Uvarov, L. B.** Optimization of technological processes for the manufacture of axle monocalcs of gas turbine engine compressors. *Flight.* Publishing house: Mechanical engineering. 2009, **12**, 24-32.
15. **Lunev, A. N., Kurylev, D. V.** Review of progressive methods of manufacturing axial monocalcs of aeronautical gas turbine engines. *Fundamental research.* 2016, **6-1**, 78-82.
16. **Kondratyuk, E. V., Pukhalskaya, G. V., Zharik, V. G., etc.** Improving the efficiency of the WSF process for centrifugal wheels by optimizing cutting modes and using high-performance processing methods. *Vestnik engine building.* 2012, **1**, 103-113.
17. **Panasenko, V. A., Kachan, A. Ya., Mozgovoy, V. F.** Roughing of centrifugal mono-wheels of GTE using plunger milling on CNC machining centers. *Aviation and space technology and technology.* 2011, **7**, 48-52.
18. **Witty, M., Schafer, A., Cabral G.** Cutting tool geometry for plunge milling - process optimization for a stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology.* 2013, **213**, 8, 1378-1386, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.090.
19. **Lunev, A. N., Moiseeva, L. T., Starikov, A. V., Ermakov, R. S.** Calculation of the kinematic error in the processing of the interlop channel by the circular tool monocalcs GTE. *News of Higher Educational Institutions. Aviation equipment.* 2007, **3**, 72-74.
20. **Bolsunovsky, S., Vermel, V., Gubanov, G.** Application of special vibration dampers for finishing milling thin-walled parts. *CAD and graphics.* 2014, **8**, 110 - 112.
21. **Junjin, M., Dinghua, Z., Baohai, W., Ming, L., Bing Ch.** Vibration suppression of thin-walled workpiece machining considering external damping properties based on magnetorheological fluids flexible fixture. *Chinese Journal of Aeronautics.* 2016, **29**, 4, 1074-1083, doi: 10.1016/j.cja.2016.04.017.
22. **Vnukov, Yu. N.,** Influence of damping media on the reduction of vibrations of an elastic system of a thin-walled component. *Modern technology in mechanical engineering: zb. sciences. etc. - Kharkiv: NTU "KhPI".* 2013, **8**, 85-100.
23. **Vnukov, Yu. N., Germashev, A. I., Mozgovoy, V. F., Balushok, K. B., Kondratyuk, E. V.** Testing of the advanced technology of preparing and applying a damping medium on a mono-wheel GTE at the end milling. *Herald of engine building.* 2015, **1**, 128-130.
24. **Vnukov, Yu. N., Dyadya, S. I., Kozlova, E. B.** Evolution of the development of the research of forces under cylindrical milling from static to dynamic processing conditions (part 2). *Modern technologies in machine building.* 2016, **11**, 20 - 41.
25. **Reza Kashyzadeh, K., Ostad-Ahmad-Ghorabi, M. J.** Study of Chatter Analysis in Turning Tool And Control Methods – A Review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.* 2012, **2**, 4, 1-5.
26. **Jean-Vincent Le Lan, Audrey Marty, Jean-Francois Debongnie.** Providing stability maps for milling operation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* 2007, **47**, 1493-1496, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.09.026.
27. **Thevenot, V., Arnaud, L., Dessein, G., Cazenave-Larroche G.** 'Integration of dynamic behaviour in stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin walled structure milling'. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2006, **27**, 638-644, doi: 10.1007/s00170-004-2241-1.

28. **Vnukov, Yu. N.**, Dyadya, S. I., Kozlova, E. B. On the influence of constructive and geometric characteristics of end mills on the vibration resistance of the milling process. *Cutting and tools in technological systems*. 2016, **86**, 7-17.
29. **Goldberg, M.** Increasing productivity through the use of innovative instrumental technologies. *Equipment and tools for professionals*. 2013, **2**, 12-14.
30. **Winston A. Knight.** Fundamentals of Metal Machining and Maching Tools. *Geofrey Boothoyd*. 2005, Third Edition, 608.
31. **Kozlova, O. B.** Inhibition of regenerative self-oscillations during milling of a thin-walled element of a part by the end cylindrical cutters: Abstract of a thesis Cand. Tech. Sci. Diss. 05.03.01. Kharkiv Polytechnic Institute, National Academy of Sciences of Ukraine. tech Unitary. Kharkiv, 2016, 24 p.
32. **Tarabrin, G., Saveliev, M., Mashkov, A., Nesterov, S., Koblova, E.** CAM-system PowerMILL: a monocycle of a turbine for 2 hours! *CAD and graphics*. 2009, **10**, 89 - 92.

Сведения об авторах (About authors)

Бондарь Инна Владимировна – аспирант, Сумский государственный университет, аспирант кафедры «Технология машиностроения верстаты и инструменты», г. Сумы, Украина; e-mail: ishkabond@gmail.com.

Inna Bondar – postgraduate, Sumy State University, postgraduate Department of Mechanical Engineering technology machines and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: ishkabond@gmail.com.

Криворучко Дмитрий Владимирович – доктор технических наук, доцент, Сумский государственный университет, ведущий научный сотрудник кафедры «Технология машиностроения верстаты и инструменты», г. Сумы, Украина; e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com.

Dmitrij Krivoruchko – Doctor of Technical Sciences, Docent, Sumy State University, Leading Researcher Department of Mechanical Engineering technology machines and tools, Sumy, Ukraine; e-mail: dmytro.kryvoruchko@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бондарь, И. В. Обзор современных методов обработки деталей сложных форм типа моноколесо из монолитной заготовки / **И. В. Бондарь, Д. В. Криворучко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 5-14. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.01.

Please cite this article as:

Bondar, I., Krivoruchko, D. Review of modern methods of machining of complex parts such as blisk from a monolithic billet. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **9** (1285), 5–14, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.01.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бондар, І. В. Огляд сучасних методів обробки деталей складних форм типу моноколесо з монолітної заготовки / **І. В. Бондар, Д. В. Криворучко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 5-14. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.01.

АНОТАЦІЯ В даний час деталі машин стають все більш складними і точними. У цих умовах застосування багатоосьових верстатів з ЧПУ є дієвим рішенням поставлених завдань, так як різні компонування цих верстатів дозволяють обробляти деталі різної серійності, габаритів і конфігурацій. В роботі подано класифікацію деталей, що вимагають п'ятиосової обробки. Розглянуто особливості та резерви підвищення ефективності п'ятиосової обробки виділених типів деталей. Окремо розглянуто методи підвищення ефективності п'ятиосової обробки деталей складних форм (типу турбінних лопаток, крильчаток і ін.) На всіх етапах обробки (чорнова обробка; напівчистова обробка; чистова обробка). Виділено моменти, яким слід приділяти особливу увагу при п'ятиосовій обробці деталей складних форм типу моноколесо з монолітної заготовки.

Ключові слова: п'ятиосова обробка; деталі складних форм; моноколесо; вібрація; стратегія обробки.

Поступила (received) 08.03.2018